



УДК 621.982.45

**В.А. Томило, В. В. Левкович, А.В. Ветошкин**  
ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»  
г. Минск, Республика Беларусь  
E-mail: anton.vetoshkin.99@gmail.com  
Дата поступления 30.06.2023

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ВАЛКОВОЙ ПРАВКИ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

### Аннотация

Рассмотрены особенности технологии многовалковой правки толстых листов и заготовок сложной конфигурации, представлена схема рекомендуемого изменения кривизны изгиба проката вдоль листопрямильной машины с описанием каждой зоны по технологическим признакам, а также выделены основные направления совершенствования конструкций ЛПМ и технологий правки. Описаны возможные дефекты в процессе исправления геометрии на ЛМП различной конструкции. Создана компьютерная модель для исследования напряженно-деформированного состояния полосы, применяя метод конечных элементов. Для описания упругопластических деформаций при моделировании использовались линейная и билинейная изотропная модель. Представлен анализ процесса валковой правки с учетом явлений, протекающих в металле, подвергающемся знакопеременному нагружению с уменьшающейся амплитудой (взаимодействие упругой и пластической деформации, эффект Баушингера и пр.).

**Ключевые слова:** листопрямильная машина, упругопластическая деформация, эффект Баушингера, валковая правка, напряженно-деформированное состояние, линейная изотропная модель, билинейная изотропная модель.

### Введение

Правка относится к операциям, выполняемым в ходе основного производства. Применение данной технологии является необходимостью, так как предотвратить искривления и нарушение формы изделия в процессе изготовления не всегда возможно.

В некоторых случаях методы предупреждения искривлений могут быть технически возможными, но неэффективными с точки зрения экономики. Все это делает процесс правки ответственной операцией в технологической карте изготовления деталей.

Технологии правки толстых листов и заготовок сложной конфигурации во многом определяются конструкцией правильной машины и, в первую очередь, количеством независимых регулировок рабочих роликов. Анализ развития конструкций показывает на постоянное увеличение количества независимых регулировок рабочих роликов.

Наиболее простые и старые машины имеют параллельную настройку и минимальное количество роликов, которое равно пяти. Такие машины позволяют регулировать один параметр правки - расстояние между верхним и нижним рядами роликов. Поэтому глубина пластической проработки на них незначительна, так как она определяется необходимостью обеспечить получение прямого проката после последних роликов.

Две независимые регулировки имеют машины с наклонным регулированием одной из траверс. Машины с параллельно смещаемой траверсой и независимо регулируемые первым и последним роликами позволяют независимо регулировать три параметра правки. Четыре независимые регулировки имеют машины с наклонной регулировкой одного ряда роликов и независимо регулируемые первым и последним роликами из другого ряда.

В последнее время наблюдается переход к машинам, в которых увеличивается количество независимых регулировок или

практически все рабочие ролики имеют независимое регулирование, и поэтому их технологические возможности наиболее широки.

### Основная часть

Рассмотрим возможность достижения высшего качества правки листов, учитывая оптимальное распределение кривизны изгиба проката между рабочими роликами машины. Опыт показывает целесообразность использования технологии, основанной на шести зонах правки (рисунок 1). Эту методику можно назвать «идеальной» способом правки листов. Каждая из этих зон выполняет свои технологические функции: зона захода (I), переходная зона (II), зона наибольших деформаций (III), ещё одна переходная зона (IV), зона стабилизации (V) и зона выправления и выдачи (VI) [1].

Зона захода, выполняет важные функции, такие как обеспечение плавного входа листа в машину под небольшим углом, надёжный захват и направление листа на первые ролики листопрокатного стана, а также передача его в последующие зоны. Для достижения этих целей используются постепенно увеличивающийся изгиб листа.

Вторая выполняет роль промежуточной зоны и обеспечивает быстрое увеличение кривизны изгиба до максимальных значений.

Третья зона является основной и ответственна за создание наибольших пластических деформаций в прокате (зона наибольших деформаций). Для обеспечения эффективной правки важно, чтобы пластические деформации в этой зоне составляли от 75% до 80% от площади поперечного сечения листа (коэффициент пластической проработки сечения  $K_{пс} = 75\% \dots 80\%$ ).

Четвертая выполняет роль промежуточной зоны и обеспечивает быстрое снижение кривизны листа до значений, характерных для пятой зоны.

Пятая зона представляет собой последовательность постепенно уменьшающихся изгибов проката с целью обеспечить стабильность процесса правки по двум аспектам.

Во-первых, пятая зона имеет задачу обеспечить стабильность правки листов с учетом различий в исходной не прямолинейности, механических свойствах и геометрических размерах поперечного сечения листа. Эти различия могут проявляться как в пределах одного листа, так и внутри партии одного сортамента. Устойчивый режим правки позволяет добиться плоскостности листов одного сортамента в требуемых допусках с минимальной необходимостью перенастройки последнего ролика (в идеале - без перенастройки последнего ролика за один проход).

Во-вторых, в этой зоне следует обеспечить прямолинейность переходных участков между областями некачественной правки, которые находятся на расстоянии от  $0,7t$  до  $2,0t$  от переднего и заднего торцев листа (где  $t$  - расстояние между опорными роликами). Как правило, условия правки этих переходных участков отличаются от условий правки средней части листа и от условий изгиба концевых участков, где пластические деформации отсутствуют.

Последняя, шестая зона правки, обеспечивает выправление и достижение нулевой кривизны в любом месте средней части листов, имеющих средние значения исходных параметров. Кроме этого, лист должен выдаваться практически горизонтально. Отметим, что последние три зоны должны способствовать получению оптимальной эпюры остаточных напряжений в готовом листе (раздробление и снижение напряжений около поверхности листа).

Таким образом, в каждой зоне необходимо иметь по крайней мере один изгиб, а в зоне III – минимум два изгиба. Следовательно, минимальное количество изгибов при «идеальном» способе составляет 7, а минимальное количество роликов - 9. В практике обычно зоны не разделяются отдельными роликами, а плавно переходят друг в друга.

На процесс правки и его стабильность влияют не только различия в исходной не прямолинейности листов до начала правки.

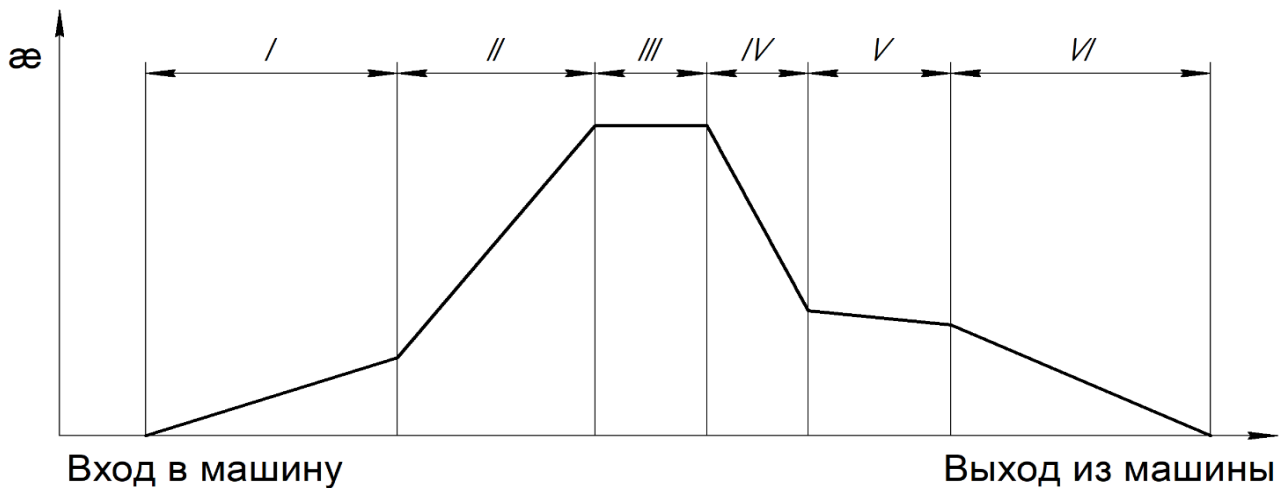


Рисунок 1. Рекомендуемое изменение кривизны изгиба проката вдоль ЛПМ при «идеальном» способе правки

Существуют также два параметра, которые значительно влияют данную операцию: предел текучести и толщина листа. Особенно важен разброс этих параметров как на площади одного конкретного листа, так и внутри партии, подлежащей правке. Ширина листов оказывает почти линейное влияние на усилия и моменты, необходимые для правки, при этом кривизна изгиба и коэффициент проникновения пластической деформации ( $K_p$ ) не изменяются при постоянной настройке роликов.

Определение номинальных значений толщины, ширины, предела текучести и начальной искривленности листа перед холодной правкой не представляет больших трудностей. При технологическом расчете (когда требуется исследовать процесс на действующей машине) толщина и ширина листов передается со стана, предел текучести прокатанной марки стали определяется при стандартных механических испытаниях на разрыв образцов, исходная искривленность принимается равной среднему значению по партии, которое практически всегда близко к нулю.

Диапазон изменения толщины может принят либо по стандарту, в соответствии с которым выпускается исследуемая партия листов, либо получен со стана (часто прокатчики стараются получить толщины ближе к нижнему допуску стандарта с целью экономии металла). Диапазон изменения исходной непрямолинейности листов подлежит либо измерению, либо заданию

на основе статистических данных прокатчиков. Нижнее значение предела текучести обычно указывается в стандартах на выпускаемую марку стали. Полный диапазон изменения предела текучести лучше определять по справочникам или марочникам стали, однако в них обычно рассматривают большие деформации, которые характерны для условий прокатки, а не правки.

В этих же справочниках можно найти данные, учитывающие влияние скорости деформирования на предел текучести.

Однако необходимо понимать, что каждое волокно расположено на разном расстоянии от центра выправляемого сечения проката и поэтому при правке имеет разные деформации и деформируется с разной скоростью. Отсюда предел текучести изменяется по высоте листа. Для учета этого фактора следует пересмотреть основополагающие расчетные формулы, что усложнит расчет.

Поэтому рекомендуется при использовании предлагаемой или более простых моделей расчета использовать итеративный расчет и определять номинальное и максимальное значения предела текучести при средней скорости деформации по сечению проката (а не при наибольшей), а так же использовать по возможности компьютерное моделирование процесса правки, которое может учесть большее количество параметров без многих упрощений.

Еще к одной основной особенности процесса правки листов относится неравномерность деформаций листа по его ширине при правке. В случае если жесткость рабочего ролика недостаточна, то его середина прогибается под нагрузкой сильнее, чем края. Тогда реальный прогиб средней части листа становится меньше, а краев – больше требуемого. Это приводит к разной пластической деформации и зависимости режима правки конкретного элемента листа от его расстояния до кромки.

В результате правки на машинах с податливыми рабочими роликами лист приобретает не только ухудшенную продольную прямолинейность, но и неравномерное (в виде параболы) распределение остаточных напряжений по ширине готового листа. Такой лист может терять свою плоскостность, образуя срединную коробоватость, «елочку» или краевую волну.

Потеря плоскостности может происходить либо сразу после выхода листа из правильной машины, либо при его транспортировании, либо при последующей продольной разрезке листа у потребителя. Исследование неравномерных по ширине деформаций листов с помощью собственной математической модели выполнено в единственной работе [2] компанией «Irsid», Франция, и работа с самого начала была нацелена на использование на 4-х заводах группы «Usinor Sasilor» («Sollac», Франция; «GTS Industries», Дюнкерк, Франция;

«Dillinger Huttenwerke», Диллинген, Германия; «Creusot - Loire Industrie», Франция). В модели учтены противоизгиб и деформации роликов по ширине листа, неравномерное распределение продольных и поперечных напряжений по ширине и высоте листов, в том числе до и после правки. Последующие публикации подтвердили использование данных исследований в промышленных условиях на всех четырех вышеуказанных заводах.

Совершенствование конструкции валковых систем идет в направлении повышения жесткости рабочего ролика, регулирования его формы, введении системы противоизгиба роликов или использовании такой начальной параболической формы рабочего ролика, которая под нагрузкой распрямляется и становится прямолинейной. Однако полностью исключить неравномерность деформаций листа по его ширине все равно не удастся. В идеале при любой ширине листа следует стремиться к прямой линии контакта рабочего ролика с листом, а также к параллельности таких линий контакта на различных рабочих роликах. Только в этом случае каждый элемент листа будет иметь при правке одинаковый по ширине прогиб под конкретным рабочим роликом и каждый элемент листа (независимо от его расположения по ширине) пройдет одинаковый режим деформаций.

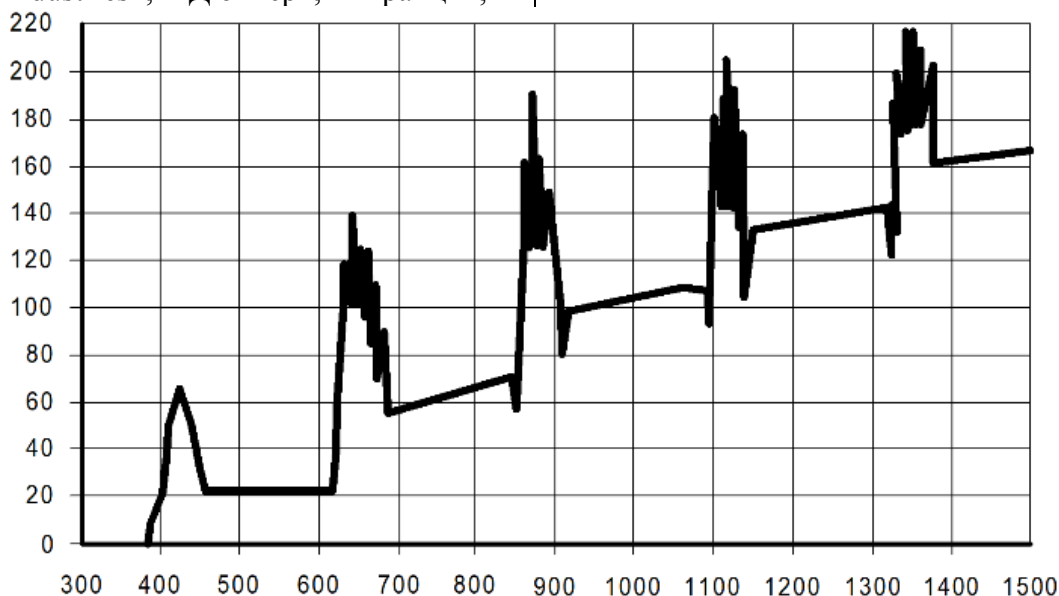


Рисунок 2. Суммарное тянущее усилие при заходе (погрешности расчета не сглажены), кН

Процесс правки концевых участков листов имеет свои особенности. Из известных публикаций на эту тему следует отметить единственную работу [3, с.202 - 203], в которой предпринята попытка решить задачу захода толстого листа в ЛПМ с помощью элементарных геометрических построений.

Сначала рассмотрим нагрузку на привод ЛПМ. На (рисунке 2) показано развитие суммарного тянущего усилия при заходе листа в машину. Так же, четко видны пиковые нагрузки на привод.

Было определено, что нагрузка при заходе практически на каждый ролик превышает нагрузку в установившемся режиме. Для рассмотренного примера превышение достигало 25%. Для других режимов и настроек роликов развитие тянущего усилия во времени и превышение его над параметрами установившегося режима будет другим и нуждается в дополнительных расчетах.

Так же было определено, что при заходе листа на ролик  $i$  резко возрастает кривизна изгиба под роликом  $i-1$ , и пик кривизны формируется не только под роликом  $i-1$ , но и под роликом  $i-2$  (кривизна под роликом  $i-3$  меняется намного слабее). Причем пик под роликом  $i-2$  наибольший, что связано с ужесточением схемы защемления листа в роликах и приближением её к схеме изгиба средней части листа с максимальными пластическими деформациями и защемлением листа с двух сторон.

Таким образом, на расстояниях примерно  $t$  и  $2t$  от переднего торца листа формируются два пика остаточных кривизн, которые продвигаются по машине и меняют свой знак. Отметим, что так происходит только при одинаковых или мало отличающихся шагах правильных роликов. В итоге, на переднем конце готового листа накатываются два пика остаточных кривизн.

Поэтому на всем листе на расстоянии  $0,7t$  от переднего и заднего торцов листа выделяются направленные зоны, где пластическая деформация при правке на ЛПМ не проявляется. Далее к ним примыкают две зоны

некачественной правки, которые расположены на расстоянии  $0,7t \dots 2,0t$  от переднего и заднего торцов выправленного листа. И только после этого расположена средняя часть листа, которая имеет наилучшее качество, так как правится в установившемся режиме.

Некоторые разработчики предлагают изменять настройку роликов во время прохождения концов листов через листопрямильную машину. Например, фирма «SMS-Demag, AG» [4] через контроль давления в гидравлическом нажимном устройстве предлагает держать постоянным суммарное усилие на верхней траверсе вне зависимости от того, какая часть листа находится внутри машины. Таким образом, передний и задний концы листа стараются пережимать больше, чем его середину. По-видимому, при таком способе регулирования произойдет дополнительное ухудшение процесса правки концов, удлинение участка некачественной неустановившейся правки, увеличение ударных нагрузок на оборудование и прокат.

#### **Моделирование процесса валковой правки и исследование напряженно-деформированного состояния**

Для построения компьютерной модели процесса правки используется много-роликковая схема, в которой принимаются определенных допущениях. В этой модели правильные валки рассматриваются как абсолютно твердые объекты, что позволяет сократить время вычислений на компьютере. Сама деталь моделируется как упруго-пластическое тело. В решении трехмерных задач методом конечных элементов часто применяются элементы типа Solid 164 и Shell 163.

Основными материалами для правки являются Сталь35 и 10ХСНД по ГОСТ 19282-73, ГОСТ 19281-73, для которых принимаются следующие единые параметры с максимальным сопротивлением деформации: модуль Юнга 210000 МПа, коэффициент Пуассона 0,3, плотность 7850кг/м<sup>3</sup>, предел текучести  $\sigma_T=390$ МПа,

предел прочности для листов и полос в состоянии поставки  $\sigma_B = 530 \text{ МПа}$ , удлинение  $\delta = 19\%$ .

На основе полученных данных разрабатывается модель, описывающая упрочнение материала. При решении трехмерных задач методом конечных элементов применяется линейная (рисунок. 3) или билинейная изотропная модель, которая используется для описания упругопластических деформаций (рисунок. 4). Кривая модели состоит из двух компонентов - упругой и пластической составляющих.

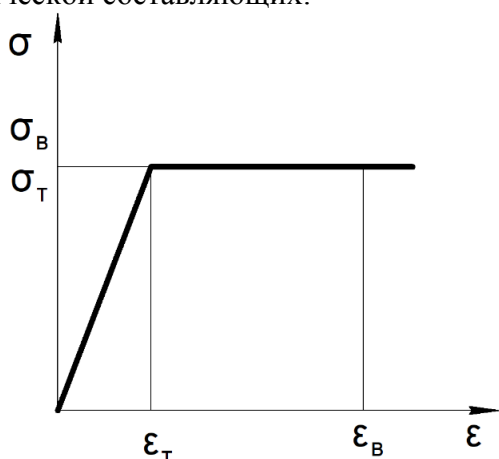


Рисунок 3. Линейная изотропная модель

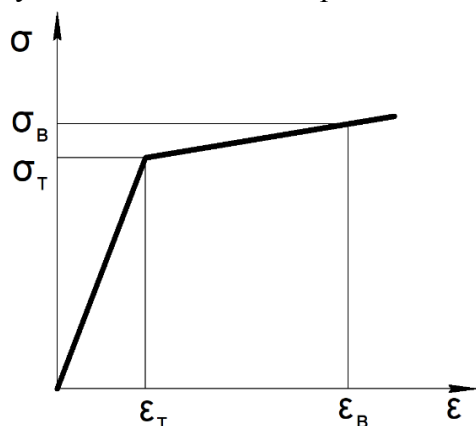


Рисунок 4. Билинейная изотропная модель

Билинейная модель может быть изотропная и кинематическая.

Эти модели отличаются наличием/отсутствием эффекта Баушингера.

Если металл подвергается пластической деформации с одним направлением, то при изменении направления деформации обычно наблюдается снижение предела текучести. Разница между пределами текучести при растяжении и сжатии, которая равна  $2\sigma_y$ , остается постоянной. Это явление и есть эффект Баушингера. В нашей компьютерной модели в настоящее время этот эффект не учитывается, что, вероятно, приведет к завышению результатов расчетов.

Скорость вращения правильных валков должна обеспечивать скорость металла  $v = 100 \text{ мм/с}$ . Коэффициент трения  $\mu$ , который обычно варьируется в различных источниках (от 0,3 до 0,7), в данном случае будет равен 0,4. Расчеты проводились для материала с толщиной  $h = 10 \text{ мм}$  и шириной  $B = 50 \text{ мм}$ . Рассматривался случай правки с использованием 13 валков диаметром  $D = 96 \text{ мм}$  и межосевым расстоянием между роликками  $t = 100 \text{ мм}$ . В этой схеме (рисунок 5) использовались 11 приводных валков (6 верхних и 5 нижних). В данном расчете сравнивались напряженно-деформированные состояния (НДС) линейной и билинейной изотропных моделей материала при правке валками. Результаты представлены на рисунках 6 и 7.

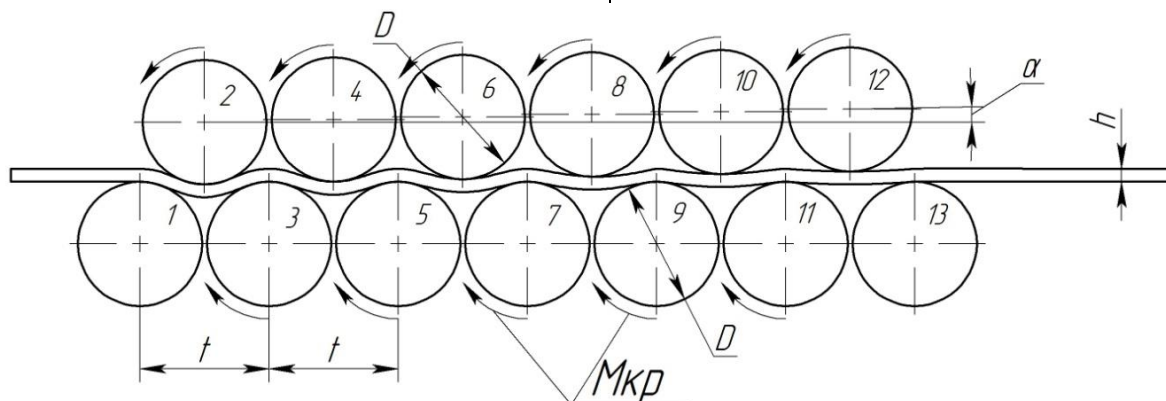


Рисунок 5. Схема правки (приводные 11 валков)

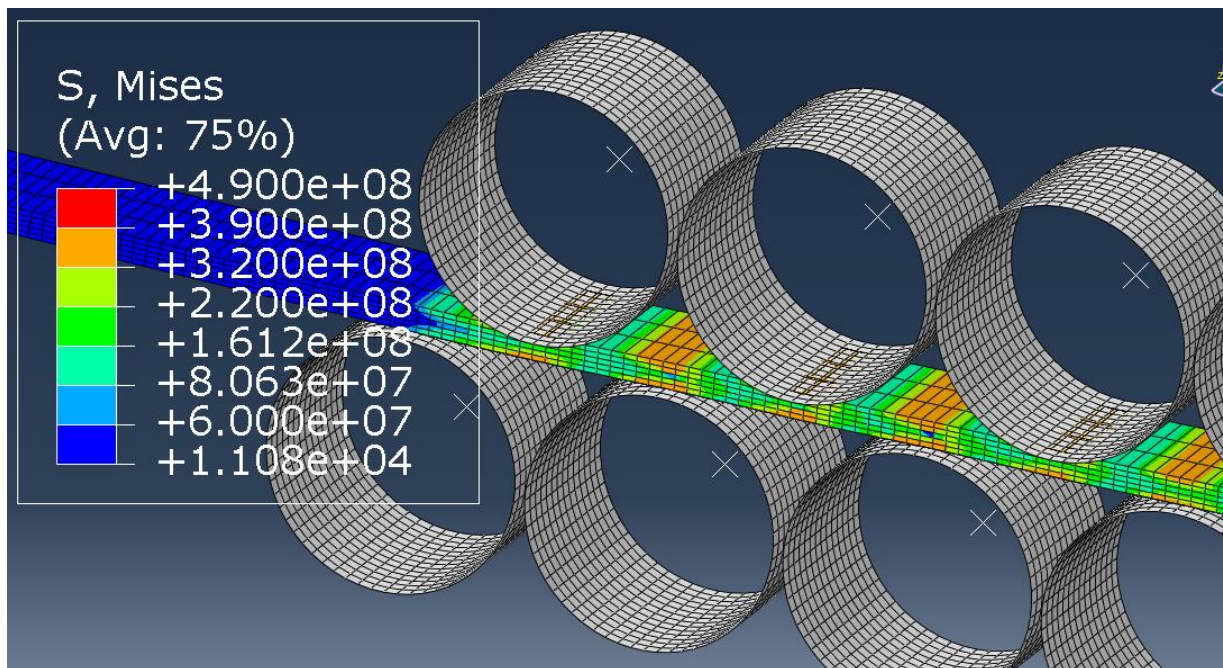


Рисунок 6. НДС металла линейной изотропной модели

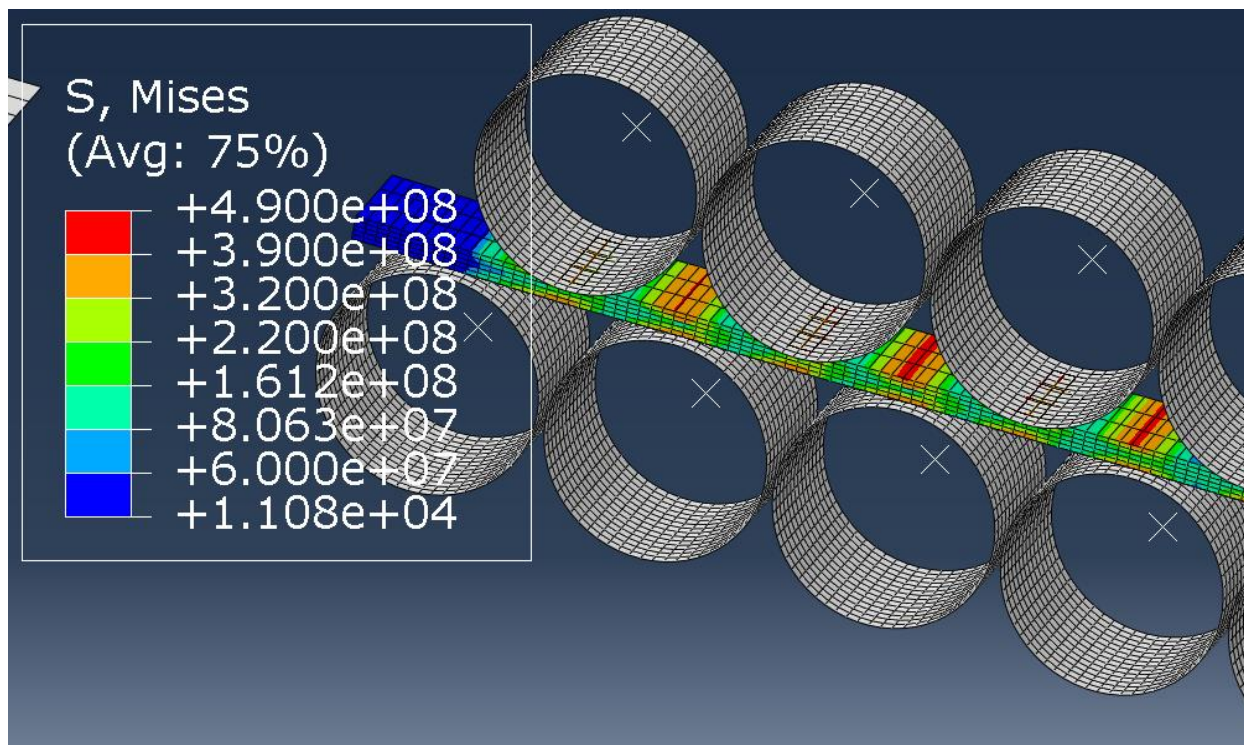


Рисунок 7. НДС металла билинейной изотропной модели

### Заключение

Изучение процесса правки в отношении других процессов ОМД, таких как прокатка, отстает из-за необходимости учета множества явлений, происходящих в металле при знакопеременной нагрузке с уменьшающейся амплитудой. В этих яв-

лениях участвуют как упругая, так и пластическая деформация, эффект Баушингера и другие.

В процессе правки существуют условия, которые затрудняют процесс (упрочнение), а также условия, которые облегчают его (эффект Баушингера). Все это может приводить к значительным различиям в результатах расчетов, выполненных с использованием различных методик.

Настройка валков для правки может значительно отличаться для различных материалов с разными толщинами. Кроме того, необходимо учитывать возможность начального захвата полосы. Поэтому для достижения точных результатов и создания корректной компьютерной модели требуется учет максимального числа необходимых параметров для каждой конкретной станки.

Следует отметить, что у билинейной изотропной модели ярко выражен эффект упрочнения, несмотря на то что прогиб валков от начальных пар к конечным уменьшался.

### Библиографический список

1. Технология и оборудование валковой правки листового металла = Technology and equipment of roll straightening of sheet metal / В. А. Томило [и др.] // Литье и металлургия. – 2022. – № 4. – С. 70-78.
2. Bourgon J. Y., Dreistadt D., Guillard O., Irastorza L. Planage en tolèrie forte. Modélisation et application industrielles. Правка толстых листов. Математическое моделирование и его применение // Rev. met. (Fr.). - 1993. - 90, № 4. - С.537-544. - Фр.; рез. англ., нем., исп.
3. Долженков Ф.Е., Коновалов Ю.В., Носов В.Г. и др. Повышение качества толстых листов. - М.: Металлургия, 1984. - 247с.
4. Kaden V., Konig A. High performance leveller for hot and cold levelling of heavy plates. Усовершенствованная машина для горячей и холодной правки толстых листов // MPT Int., [MPT: Met. Plant and Techn.]. - 1997. - 20, № 2. - С. 92-94, 96, 98- 100

---

### *Information about the paper in English*

**V.A. Tomilo, V.V. Levkovich, A.V. Vetoshkin**

Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus  
Minsk, Republic of Belarus

E-mail: anton.vetoshkin.99@gmail.com

Receipt date: June 30, 2023

### PROCESS FEATURES REGARDING ROLLER LEVELLING OF PLATES AND UNDERSTANDING THE STRESS-STRAIN STATE

#### Abstract

This paper considers the process of multiple-roller levelling of plates and complex-shape billets, describes a recommended camber adjustment pattern along the leveler while also describing each zone based on process parameters and highlights the key optimization areas in terms of leveller design and the actual process. Possible defects are described that may result from levelling in machines of different design. A finite element model was built for examining the stress-strain state of the strip. The authors used a linear and bilinear isotropic model to describe the elastoplastic strains during modelling. The paper analyzes the process of roller levelling accounting for the phenomena that occur in the material subjected to alternating load with a reducing amplitude (interaction between elastic and plastic strains, Bauschinger effect, etc.)

**Keywords:** Plate leveller, elastoplastic strain, Bauschinger effect, roller levelling, stress-strain state, linear isotropic model, bilinear isotropic model.

---